

МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА БИОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

С. С. Попова

Биофизический эксперимент сочетает в себе особенности, которые в некоторых случаях делают проблематичным анализ его методологии с помощью концепций, разработанных на материале физических или биологических исследований. Отдельные особенности, характерные для обращения к эмпирическим основаниям в биофизике, выявляются при помощи выделения в эксперименте эмпирических опосредующих структур. В статье рассматриваются вопросы, связанные с ролью теории, взаимосвязью прибора и объекта исследования, воспроизводимостью результатов.

Ключевые слова: эксперимент, биофизика, методология, эмпирические опосредующие структуры

Специфика биофизического эксперимента непосредственно состоит в двух особенностях, которые хотя и присущи не только биофизике, в биофизических исследованиях проявляются в наиболее выраженной форме, вместе обостряя методологическую проблематику эксперимента.

Первая из этих особенностей связано с неоднородной множественностью взаимодействующих факторов, вовлеченных в эмпирическое исследование. Ключевым моментом здесь является не количественная составляющая, а взаимосвязанность и гетерогенность используемых в эксперименте процессов. В любом биологическом явлении динамически сплетено множество химических и физических (электрических и механических) процессов, в которых задействованы разные уровни единой системы. Очень проблематично поставить эксперимент, в котором интересные исследователя процессы были бы отделены от сопутствующих, взаимосвязанных явлений, особенно тогда, когда представления об этих процессах и явлениях находятся на стадии формирования.

Характерной иллюстрацией проявления данной особенности можно считать попытки А. Гальвани эмпирически доказать существование в живых организмах собственных источников электрического тока, не связанных с контактной разностью потенциалов. А. Вольта, критикуя

выводы из опытов своего оппонента, указывал на то, что сама вода является хорошим проводником, а разнородность может быть обеспечена разным составом растворенных солей или перепадом температур и, кроме того, возможно механическое возбуждение нерва, вызванное манипуляциями с препаратами [1]. Но если сделать солевой состав однородным по всему образцу или высушить препарат, то все биологические процессы существенно изменятся или даже прекратятся, что, несомненно, отразится на генерации «животного» электричества. Тесная связь двух явлений длительное время не давала возможности явно продемонстрировать различия в их природе. Прошло более столетия, в течение которого существенно изменились как теоретические представления, так и используемая аппаратура, прежде чем биоэлектрические процессы получили научное объяснение и эмпирическое обоснование.

Подобные проблемы возникают и при поисках экспериментального доказательства нетеплового воздействия на биологические объекты электромагнитного излучения с энергией кванта, меньшей или близкой к среднетепловой энергии при температурах, благоприятных для организмов. Тепловые процессы сопутствуют поглощению излучения и являются одной из важнейших составляющих биохимических реакций. Общее термостатирование не исключает возможного влияния локального нагрева и изменений, связанных с возникновением микроскопических тепловых градиентов. Именно поэтому, несмотря на значительное количество сообщений о нетепловых эффектах при облучении биологических объектов в терагерцовом и более низких частотных диапазонах, концепция нетеплового воздействия среди научной общественности вызывает споры [2].

Даже в тех случаях, когда экспериментальный поиск ведется в хорошо исследованной области биофизики, когда известны все процессы, сопутствующие изучаемому, требуется определенное мастерство экспериментатора, чтобы создать условия для выделения существенных характеристик.

Вторая особенность биофизического эксперимента связана с необходимостью поиска в области, для которой не существует достаточно полно разработанной теории. На протяжении всей истории науки исследователи стремились соотнести имеющиеся знания об окружающем мире с явлениями живой природы. Интерес к процессам, протекающим в организмах, поддерживался осознанием собственной принадлежности к биологическому миру. Неудивительно, что в ходе поисков соответствия ученым приходилось сталкиваться с тем, что явления с трудом вписываются в теории, разработанные для физических объектов.

Проблемы могут возникнуть из-за того, что изучаемые биологические процессы имеют принципиально иную природу, выходящую за рамки существующей научной картины мира. Так, например, было в XVIII в., когда экспериментальные исследования «нервного флюида» велись на основе механистических концепций, не дающих полноценной интерпретации наблюдаемых явлений [3]. Электромагнитная теория была разработана много позже и с опорой, в частности, на результаты упомянутых экспериментов. Причем полное понимание механизмов процесса распространения нервного импульса стало возможным только с появлением квантовой физики.

Но и в том случае, когда для интерпретации исследуемых явлений не требуется пересмотра фундаментальных концепций, проблема применения существующих теорий может возникнуть из-за невозможности использования хорошо разработанных способов решения. Так, переход от микроскопических параметров к макроскопическим, сравнительно легко осуществляемый в случае однородных и изотропных сред или сред с трансляционной симметрией, вызывает значительные трудности на масштабах, где существенны особенности, связанные со сложной внутриклеточной структурой. Нередко неприменимы критерии линейного приближения или других, хорошо зарекомендовавших себя в физике, аппроксимаций.

Необходимо отметить, что выделенные особенности наиболее ярко проявляются в сравнительно небольшой области биофизических исследований. Широко распространены и успешно развиваются именно те направления биофизики, где упомянутые выше проблемы удастся преодолеть. В таких случаях методология эксперимента не отличается принципиально от методологии физического или биологического эксперимента, обращение к которым в литературе по философии науки встречается наиболее часто.

Для физических исследований обычно характерно наличие детально проработанной математизированной теории, оперирующей объектами высокой степени абстракции. Традиционным для эксперимента в биологии является сопоставление наблюдаемых факторов, оставляющее вне зоны внимания разветвленную сеть взаимосвязей фоновых процессов, вовлеченных в исследование.

Здесь необходимо отметить, что речь идет об общих тенденциях, а не о резком разграничении. Немало направлений в физике имеют дело с феноменологическими обобщениями, в то время как современная биология немыслима без обращения, например, к достаточно абстрактному понятию

«ген». Несмотря на отдельные контрпримеры, общая схема, выделяющая указанные признаки как характерные, остается справедливой.

В современной литературе по философии науки нередко встречаются утверждения, что только один из способов обращения к эмпирическим основаниям оказывается методологически правильным. Так, например, М. Вебер в «Философии экспериментальной биологии» пишет, что идеалом является сведение биологических феноменов к физико-химическим теоретическим основаниям [4]. Противоположный пример – работа Н. Картрайт «Как лгут законы физики», в которой, наоборот, очень критично рассматривается роль фундаментальных физических теорий в экспериментальной практике и защищается тезис о том, что общим образом научности являются биологические исследования, не уходящие далеко от наблюдаемых фактов [5].

Методологические приемы, позволяющие экспериментатору выделить объект исследования из сложной сети взаимосвязанных процессов, в которые вовлечены реальные объекты, у физиков и биологов разные и в каком-то смысле противоположные. В физике чаще всего усилия направлены на создание жестко фиксированных условий, так чтобы обострить действие исследуемых факторов и нивелировать влияние побочных. Приемом, традиционным для биологического эксперимента, является проведение испытаний при таком многообразии фоновых условий, чтобы множественность и спутанность вовлеченных в эксперимент взаимодействий можно было с хорошей степенью точности аппроксимировать однородными условиями (например, рандомизация, метод случайных блоков и т.п.).

Эффективность того или иного приема непосредственно зависит от уровня развития теоретических представлений в данной области исследования. Хорошо разработанная теоретическая база позволяет экспериментатору целенаправленно формировать условия, выводящие на передний план отдельные свойства изучаемых объектов и нивелирующие влияние побочных факторов.

Достаточно подробно особенности актуального выделения той или иной связи из общей совокупности взаимодействий, в которые вовлечен реальный объект, рассматриваются на примере физики в рамках «деятельностного подхода» [6]. Благодаря деятельности экспериментатора «явно или неявно совокупность взаимодействующих в опыте объектов как бы организуется в системе определенной цепочки отношений: целый ряд их реальных связей оказывается несущественным, и функционально выделяется лишь некоторая группа отношений, характеризующих изу-

чаемый “срез” действительности» [7]. Причем в развитых формах эксперимента объекты эмпирического исследования изготавливаются искусственно благодаря использованию приборных и «квазиприборных» (естественно возникших в природе независимо от деятельности человека) устройств [8].

Важно отметить, что организация взаимодействующих в опыте объектов в системе определенной цепочки взаимоотношений подразумевает знание о характере связи «вовлеченных» факторов не только с объектом исследования, но и между собой, содержащееся в развернутой теоретической схеме.

Когда для области исследования не существует детально проработанной теории, эмпирические исследования нередко принимают вид выявления причинно-следственной связи между воздействующим фактором и изменением какой-либо наблюдаемой характеристики. При этом вне зоны внимания остаются не наблюдаемые явно механизмы реализации такой связи. Это обусловлено особенностью, нередко отмечаемой в научной литературе: «в биологических... исследованиях приходится иметь дело с... экспериментами, в которых многие факторы не поддаются строгому учету и контролю» [9].

Основным приемом, позволяющим выделить исследуемый эффект на фоне побочных взаимодействий, является создание условий, однородных по отношению к фоновым факторам. То есть вместо создания жестко зафиксированной «приборной» или «квазиприборной» ситуации ставят целью провести испытания при таком многообразии фоновых условий, чтобы множественность и спутанность вовлеченных в эксперимент взаимосвязей можно было с хорошей степенью точности аппроксимировать однородными (причинно-гомогенными) условиями.

Стремление в таких исследованиях выявить влияние действующих факторов не только на эффект, но и друг на друга сильно усложняет задачу. Одной из серьезных проблем в этом случае является корректный учет взаимосвязи при многофакторном анализе. Приемы приведения к причинно-гомогенной ситуации, например уже упоминавшиеся рандомизация или метод случайных блоков, требуют тщательной проверки на условия применимости и нуждаются в модификации при наличии взаимосвязи факторов.

Так, в книге Н. Бейли «Статистические методы в биологии» приводится пример, когда при одном методе статистической обработки данных были получены сведения о высокой степени корреляции между длиной хвоста одного из видов птиц и высотой местности, где они оби-

тают, а при другом методе высота местности оказывалась совсем незначимым фактором. Объяснение такого несоответствия состоит в том, что во втором случае исследовалась зависимость как от географического фактора (высота местности), так и от метеорологического (максимальная температура), которые сами по себе связаны очень сильно. И правильной интерпретацией полученных данных будет такая: «при рассмотрении совокупности птиц, живущих при данной максимальной температуре, добавочное действие высоты местности, в которой они обитают, окажется незначимым» [10].

Применение сложных схем эксперимента, обусловленное стремлением либо уменьшить количество необходимых проб, либо учесть большее количество факторов, требует от исследователя предварительного знания о характере взаимосвязи вовлеченных в эксперимент объектов. В области исследования, где не разработано детализированной и разветвленной системы взаимосогласованных теоретических представлений проблематичным является как жесткая фиксация фоновых факторов, так и корректный учет неоднородности их влияния.

Для нас в данной работе основной интерес представляют методологические особенности экспериментальных исследований, в которых поиск направлен на выявление свойств, недоступных для непосредственного наблюдения, при этом в отсутствие надежной и детально разработанной теории. Важно понимать, что в таких условиях построение жестко детерминированной структуры наблюдения и четкая фиксация объекта исследования невозможны. Экспериментатор в этом случае находится в процессе поиска того, какая из комбинаций условий эксперимента может оказаться наиболее удачной для выявления интересующих характеристик. Необходимо подчеркнуть, что только в редких случаях такой поиск может быть осуществлен путем статистического обобщения, простым перебором возможных вариантов. Важнейшую роль в подобных исследованиях играют *эмпирические опосредующие структуры*, основные свойства которых были рассмотрены в одной из наших ранее опубликованных работ [11].

Эмпирические опосредующие структуры – это несколько взаимосвязанных явлений, скомбинированных в такую систему, которая позволяет по воспринимаемым органами чувств характеристикам судить о свойствах, недоступных для непосредственного наблюдения.

При отсутствии хорошо разработанной, надежной теории создание эмпирических опосредующих структур направляется общими методологическими принципами. Неверная теория также позволяет построить

эффективно работающую опосредующую схему, если в своих положениях схватывает какие-либо ключевые особенности, соответствующие действительности. Так, в XVIII в. представления о нервном импульсе как о жидкости, перетекающей по нервному волокну к мышцам, и аналогия с подобной картиной для электрического флюида, перетекающего по проводнику, позволили А. Гальвани найти способ препарирования лягушачьей лапки, высокочувствительный к электрическим воздействиям [12]. Несмотря на ошибочную теоретическую интерпретацию, была найдена такая комбинация, благодаря которой «электричество можно сделать почти видимым... и чуть ли не щупать руками» [13].

Очень важно, что в условиях освоения новой для науки области опосредующая структура не может быть жестко фиксированной. Каждый из элементов этой структуры нуждается в отдельных апробациях, перекрестных проверках, выявляющих верность теоретической интерпретации и надежность в практическом применении. Сам объект исследования при таких обстоятельствах еще не определен достаточно четко и однозначно. В период, когда во взаимосвязи вовлеченных в эксперимент процессов только нащупываются узловые точки, поспешный переход к терминам высокого уровня абстракции может стать источником ошибок. Роли объекта и средства исследования в комбинации факторов, которая обеспечивает создание наблюдаемого эффекта, могут взаимно меняться. Так, например, для А. Гальвани проводящая дуга из разнородных металлов была средством, позволяющим проявляться собственным электрическим свойствам биологического препарата, в то время как для его оппонента А. Вольта контакт проводников стал объектом исследования, а препарированная лапка лягушки – прибором.

Опосредующая структура может использоваться в качестве прибора еще до получения полноценного теоретического обоснования ее работы. И в условиях, когда исследователь может опираться только на общие методологические принципы, смутные предположения и противоречивые гипотезы, роль таких дотеоретических приборов очень велика. Они способствуют формированию представлений о свойствах исследуемой области и параметрах, при которых данные свойства могут проявляться в наиболее выраженной форме. В этом случае важным становится процесс апробации работы опосредующей структуры на более известных явлениях, позволяющий провести предварительную калибровку такого прибора. Заметим, что развитие теории дает новые возможности для конструирования приборов, которые рано или поздно вытесняют эмпирически подобранные комбинации факторов. Хотя длительное время

препарированная лапка лягушки оставалась самым чувствительным индикатором электричества, развитие электродинамики дало возможность сконструировать более точную и надежную аппаратуру.

Проблематичность выделения во взаимодействии явлений свойств отдельных связей ведет к тому, что сообщения о результатах экспериментов становятся не итогом, подтверждающим или опровергающим какие-либо теоретические гипотезы, а отправной точкой для научного спора. Кроме уже упоминавшихся исследований «животного» электричества можно привести в пример и более близкий к настоящему времени случай. Так, первая публикация П. Митчеллом результатов, подтверждающих хемиосмотическую гипотезу, послужила началом пятнадцатилетнего противостояния в сообществе биоэнергетиков, настолько остро, что получило название «окс-фосфорных войн» [14]. Именно в процессе критического обсуждения, когда оппоненты целенаправленно выискивали слабые места в интерпретации экспериментального обоснования, вынуждая его сторонников находить дополнительное подкрепление своим аргументам, а для этого видоизменять способы эмпирического опосредования, были получены несомненные доказательства существования трансмембранного потенциала в митохондриях и его роли в синтезе АТФ.

Одной из характеристик научного эксперимента является воспроизводимость результатов. Основной проблемой становится невозможность строгого учета и контроля действующих факторов, связанная с недостаточностью понимания вовлеченных в эксперимент процессов. Также затруднительны оценки степени неоднородности условий исследования, что мешает корректному использованию методов статистической обработки. Это приводит к значительной вариабельности наблюдаемых характеристик. Отметим, что здесь основным фактором является не принадлежность к биологическому или физическому, а достаточное или недостаточное понимание природы задействованных явлений. Показательной в этой связи будет цитата из трактата А. Гальвани: «...Открытое нами животное электричество как по многим другим признакам, так и в особенности по непостоянству, изменчивости и по своей способности восстанавливаться через известное время значительно соответствует обыкновенному электричеству» [15]. В период, когда уровень понимания происходящих процессов не позволял ученым контролировать ключевые факторы, электричество казалось непостоянным и изменчивым.

В таких условиях опереться на поиск инвариантного содержания экспериментов практически невозможно. Для поиска в новой области исследования особое значение приобретают яркие эффекты, неожидан-

ные и нередко парадоксальные с точки зрения привычных представлений. Таким, например, было сокращение препарата лапки лягушки в отсутствие прямого контакта с источником электричества, изначально привлечшее внимание А. Гальвани. Неординарность явления позволяет выделять те или иные параметры из взаимосвязи даже тогда, когда строгий контроль условий невозможен и корректная статистическая обработка результатов сильно затруднена.

Важно подчеркнуть, что воспроизводимость результатов экспериментов не является критерием истинности или неистинности теоретических положений, а говорит о том, насколько экспериментатор контролирует вовлеченные в изучаемый эффект процессы. В принципе, такой контроль возможен и тогда, когда исследователь руководствуется ошибочными положениями. Эмпирическая опосредующая структура, даже при неверной теоретической интерпретации, может дать возможность манипулировать параметрами, недоступными для непосредственного восприятия. Такое нередко происходит, когда практическая ценность открытых эффектов обуславливает их применение, опережающее понимание. Подобное порой сопутствовало развитию сельского хозяйства и медицины: эффективные приемы лечения могли объясняться, например, воздействием на «злых духов», а концепция теплорода помогла повысить эффективность паровых машин, игравших большую роль в период промышленной революции.

Когда А. Вольта строил свой «вольтов столб», он был уверен, что воспроизводит структуру и работу электроцитов ската (работавших, по его мнению, за счет контактной разности потенциалов), создавая «искусственный электрический орган» [16]. Созданный источник тока по сочетанию силы и надежности намного превышал известные до этого источники электричества, хотя химическая природа генерации электричества была на то время еще не объяснена.

Существенным моментом для проверки соответствия теоретических представлений действительности будет не воспроизводимость результата при одних и тех же фиксированных условиях, а возможность подтвердить результаты при помощи независимых опосредующих структур. Такая проверка помогает обнаружить «артефакты» эксперимента, когда особенности средства исследования приписываются объекту исследования, и выявить источники систематических ошибок в измерениях. Очень важным аргументом в споре Вольта с Гальвани стало обнаружение других индикаторов электричества помимо лапки лягушки: кислого вкуса на языке и ощущения вспышки при контакте с глазом.

Несмотря на то что эти индикаторы были менее наглядными, способность двух металлов быть источником электрического тока была убедительно подтверждена.

Эмпирические опосредующие структуры могут стать инструментом и более тонкого анализа методологии научного эксперимента, чем представленное в этой работе схематичное рассмотрение вопросов о роли теории и методологических принципов в обращении к эмпирическим основаниям, о взаимосвязи прибора и объекта исследования, о воспроизводимости результатов. Это потребует более детальной проработки и дальнейшего развития представленной концепции. Для биофизических экспериментов, в которых сочетается необходимость вести исследования взаимодействия разнородных факторов с неполной теоретической базы, эмпирические опосредующие структуры позволяют выявить методологические особенности, не распознаваемые при применении других подходов.

Примечания

1. См.: *Вольта А.* Новая статья о животном электричестве // Гальвани А., Вольта А. Избранные работы о животном электричестве. – Москва; Ленинград: Гос. изд-во биол. и мед. лит., 1937. – С. 403, 376.
2. См.: *Бинги В.Н., Савин А.В.* Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // *Успехи физических наук.* – 2003. – Т. 173. – С. 265–300; *Гроссберг А.Ю.* Несколько замечаний, навеянных обзором В.Н. Бинги и А.В. Савина о магнитобиологии // *Успехи физических наук.* – 2003. – Т. 173. – С. 1145–1148; *Попова С.С.* Распределение энергии по модам терагерцовых колебаний в биологических средах // *Миллиметровые волны в биологии и медицине.* – 2011. – № 3 (63). – С. 63–51.
3. См.: *Попова С.С.* Биофизический эксперимент в эпоху Просвещения // *Философия науки.* – 2011. – № 1 (48). – С. 121–132.
4. См.: *Weber M.* *Philosophy of Experimental Biology.* – Cambridge Univ. Press, 2005. – P. 29.
5. См.: *Cartwright N.* *How the Laws of Physics Lie.* – Oxford Univ. Press, 1983. – P. 55.
6. См.: *Стетин В.С.* *Теоретическое знание.* – М.: Прогресс-Традиция, 2003.
7. Там же. – С. 147.
8. Там же. – С. 151.
9. *Бейли Н.* *Статистические методы в биологии.* – М.: Мир, 1964. – С. 5.
10. Там же. – С. 201.
11. См.: *Попова С.С.* Эмпирические опосредующие структуры // *Философия науки.* – 2010. – № 3 (46). – С. 81–91.
12. См.: *Гальвани А.* *Трактат о силах электричества при мышечном движении* // Гальвани А., Вольта А. Избранные работы о животном электричестве. – С. 403.
13. Там же. – С. 124.
14. См.: *Weber M.* *Incommensurability and theory comparison in experimental biology* // *Biology and Philosophy.* – 2002. – V. 17. – P. 155–169.

15. Гальвани А. Трактат о силах электричества при мышечном движении. – С. 131.
16. См.: *Bresadola M.* Animal electricity at the end of the eighteenth century: the many facets of a great scientific controversy // *Journal of the History and the Neurosciences.* – 2008. – V. 17. – P. 8–32.

Дата поступления 10.04.2012

Институт лазерной физики
СО РАН, г. Новосибирск.
svetlanas_popova@mail.ru

Popova, S.S. Methodological specific of biophysical experiment

Biophysical experiment has peculiarities which sometimes complicate the analysis of its methodology carried by means of conceptions developed on the base of data obtained in physical or biological research. To reveal certain peculiarities which are typical for referring to empirical grounds in biophysics we should single out empirical mediate structures in experiment. The paper considers the problems of the role of a theory, the interaction of an instrument and an object in research, and results reproducibility.

Keywords: experiment, biophysics, methodology, empirical mediate structures